

کنترل فازی تطبیقی مدل مرجع مخزن شیمیایی CSRT

محمد امین زاهدی تجربی، مدرس گروه برق، aminzahedit@gmail.com

چکیده

مخزن **Continuous Stirred Tank Reactor (CSRT)**، یک مدل ایده آل از برخی نمونه‌های راکتورهای مورد استفاده در صنایع شیمیایی می‌باشد که همانند خیلی دیگر از راکتورهای شیمیایی این راکتور نیز دارای یک یا چند ورودی و در نهایت یک یا چند خروجی می‌باشد. در این مقاله، به منظور کنترل سیستم کنترلی مخزن CSRT، از نظریه کنترل فازی تطبیقی استفاده می‌نماییم که با تغییرات ارتفاع مخزن، پارامترهای کنترل کننده فازی با شرایط موجود در سیستم، تطبیق پیدا می‌کنند، و در نهایت عملکرد این سیستم کنترلی با کنترل کننده فازی مقایسه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مخزن CSRT، صنایع شیمیایی، کنترل فازی تطبیقی.

۱- مقدمه

تا کنون روشهای کنترل متنوعی جهت کنترل سیستمهای خطی ارائه شده است، مانند کنترل کلاسیک تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) و روشهای متنوع بهینه سازی عملکرد این سیستمها بوسیله الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات ارائه شده است [۱-۴]. اما در آن سو، معمولاً، بدست آوردن مدل ریاضی سیستمهای فیزیکی پیچیده کار سخت و دشواری است و ممکن است به مدل دقیقی از سیستم دست پیدا نکنیم، چرا که مجبور به تقریب، ساده سازی و یا خطی سازی سیستم هستیم. این ساده سازیها منجر به ورود عدم دقت و خطا در مدل سیستم میشود. جهت غلبه بر این مشکل مجبور به استفاده از روشهای غیر کلاسیک مانند کنترل فازی هستیم. کنترل فازی جهت تقریب زدن دینامیک های پیچیده و غیر خطی بکار گرفته می شود. [۵-۹].

از طرف دیگر، در بعضی از فرایندها به دلایل مختلف از جمله داشتن دینامیک بسیار پیچیده و غیر خطی، متغیر با زمان بودن دینامیک، تاثیر اغتشاشات شدید و وجود اندرکنش (تداخل)، کنترل کننده های ساده فازی نمی توانند به تنهایی، اهداف کنترلی سیستم را تامین نمایند. به همین دلیل انواع ایده های کنترلی پیچیده تر، مانند کنترل تطبیقی، برای کنترل فرایندها تحت این شرایط ایجاد شده است [۱۰، ۱۱].

در این مقاله، جهت کنترل دمای سیال موجود در مخزن CSRT، کنترل فازی تطبیقی مورد نظر را ارائه و در ادامه جهت نشان دادن عملکرد قابل قبول آنرا با کنترل فازی مقایسه می‌نماییم.

۲- کنترل فازی تطبیقی مدل مرجع

همانطور که می دانیم سیستم‌های فیزیکی پیچیده را معمولاً نمی توان مدل نمود و یا به مدلسازی دقیقی از سیستم نخواهیم رسید. به عبارت دیگر در اینگونه موارد، با مدل‌های ریاضی تقریبی مواجه خواهیم بود چرا که مجبور به ساده سازیها و صرف نظر از محدودیتهای خاصی میشویم. این خطای مدلسازی گریزناپذیر است همانگونه که اصطکاک و خاصیت غیرخطی بودن غیرقابل حذف هستند. جهت غلبه بر این مشکل، کنترل فازی معرفی می گردد.

کنترل تطبیقی یکی از مهمترین زمینه های تحقیقاتی در پنج دهه اخیر بوده است. پیشرفت قابل توجهی در زمینه تئوری و عملی مانند اثبات پایداری کلی و ارتقا خواص تعقیب و عملکرد سیستم‌های پیشرفته از این روش کنترلی دیده شده است. یکی از دلایل رشد سریع کنترل تطبیقی توانایی آن در کنترل سیستمها با حضور عدم قطعیتها در طول عملیات است. در واقع کنترل تطبیقی تکنیکی برای بدست آوردن مدل سیستم و استفاده از این مدل برای تولید قانون کنترلی می باشد. این روش کنترلی ترکیبی از تخمین پارامتر و قانون کنترلی است که در هنگام کار سیستم پارامترهایش تنظیم می شود. همچنین برای رسیدن به عملکرد مطلوب از قانون تطبیقی برای رویارویی با عدم قطعیتها در سیستم استفاده می شود.

پایه و اساس کنترل تطبیقی تخمین پارامتر بصورت آنلاین بر اساس سیگنالهای اندازه گیری شده و استفاده از این پارامترهای تخمینی در تولید ورودی کنترلی میباشد. از روشهای مرسوم در تخمین پارامتر میتوان حداقل مربعات بازگشتی و گرادیان نزولی را نام برد. از معیار پایداری لیاپانوف برای رسیدن به قانون تطبیق و نشان دادن همگرایی استفاده می شود. معمولاً از پروجکشن و نرمالسازی برای ارتقا مقاومت الگوریتم های تخمین استفاده خواهد شد.

تحقیقات در زمینه کنترل تطبیقی در اوایل سال ۱۹۵۰ با هدف طراحی اتوپیلوتی برای یک جنگنده با عملکرد بالا که در گستره وسیعی از سرعت و ارتفاع پرواز کرده، آغاز شد. تغییرات زیاد در بازه سرعت و ارتفاع سبب تغییرات پارامتری زیادی در طول پرواز میشد. کنترل تطبیقی به عنوان راه حلی برای تنظیم خودکار پارامترهای کنترلر به هنگام تغییر دینامیک سیستم، معرفی شد. اما علاقه به این روش بدلیل عدم شناخت کافی و سقوط هواپیمای آزمایشی کاهش یافت. اما در دهه اخیر یا پیشرفت تکنولوژی دوباره کنترل تطبیقی مورد توجه محققان قرار گرفته و در بسیاری از صنایع کاربردی مانند رباتها و موشکها و هواپیماها و پروسه های شیمیایی و سیستمهای قدرت و غیره بکار برده می شود.

مقالات بسیاری به کنترل فازی تطبیقی مدل مرجع پرداخته اند [۱۴-۱۲]. در تئوری کنترل تطبیقی مدل مرجع، هدف، طراحی کنترل کننده ای است که در مقابل تغییرات آرام در سیستم و همچنین خطاهای مدلسازی پاسخ مناسب بدهد. در کنترل فازی تطبیقی مدل مرجع براساس یک مدل مرجع، تلاش می گردد که عملکرد سیستم کنترلی را با آپدیت و تطبیق مراکز توابع عضویت فازی به مدل مرجع نزدیک نماییم.

۳- مخزن CSTR

مخزن CSTR، از پرکاربردترین مخازن مورد استفاده در صنایع شیمیایی می باشد. در داخل محفظه ی این راکتور یک واکنش شیمیایی اتفاق افتاده و در پایان محصولات نهایی واکنش در خروجی های راکتور در دسترس می باشند. برای اعمال یک سیستم کنترلی مناسب برای این راکتور نیازمند داشتن یک مدل ریاضی مناسب از فرآیندهای اتفاق افتاده در این راکتور هستیم. برای این منظور از قوانین تعادل جرم و انرژی استفاده می کنیم.

۳-۱- قانون تعادل جرم

این قانون بیان میکند که:

نرخ جرم ورودی به راکتور - نرخ جرم خروجی از راکتور = نرخ تغییرات جرم

با توجه به اینکه نرخ سیال ورودی برابر با F_{in} با چگالی ρ_{in} ، حجم مخزن برابر با V و چگالی محصول نهایی برابر با ρ و نرخ سیال خروجی برابر با F با چگالی ρ باشد. آنگاه داریم:

$$F_{in} \cdot \rho_{in} - F \cdot \rho = d(V \cdot \rho) / dt \quad (1)$$

در مورد مایعات با فرض اینکه بطور معمول چگالی مایعات ثابت است، میتوان رابطه ی (۱) را به فرم زیر ساده کرد:

$$F_{in} - F = A \cdot d(h) / dt \quad (2)$$

که در آن بجای V از معادل آن یعنی $A \cdot h$ استفاده شد.

می دانیم که در داخل راکتور، یک واکنش شیمیایی اتفاق می افتد و در طی آن یک یا چند ماده با یکدیگر ترکیب شده و در نهایت یک یا چند ماده دیگر را تولید می کنند. به این ترتیب، می توانیم معادله تعادل جرم را برای یک عنصر از واکنش به صورت زیر بازنویسی کنیم:

نرخ ورودی J_A - نرخ خروجی عنصر J_A + نرخ تولید یا مصرف عنصر J_A در طی واکنش = نرخ تغییرات عنصر J_A در داخل راکتور عنصر

برای اینکه بتوانیم این رابطه را بوسیله ی روابط ریاضی بازنویسی کنیم، احتیاج به رابطه ای داریم که توسط آن بتوانیم غلظت مواد در طی واکنش شیمیایی را بیابیم. برای این منظور فرض می کنیم که مدل واکنش بصورت یک واکنش برگشتن پذیر به فرم $A \rightarrow B$ باشد؛ با چنین شرایطی نرخ واکنش برحسب غلظت C_A را میتوان بصورت زیر بیان کرد:

$$-k \cdot C_A = d(C_A) / dt \quad (3)$$

علامت منفی بیانگر آن است که غلظت C_A در طی واکنش کاهش می یابد.

به این ترتیب می توان معادله تعادل جرم یک عنصر را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$M_A \cdot F_{in} \cdot C_{Ain} - M_A \cdot F \cdot C_A - k \cdot V \cdot C_A \cdot M_A = M_A \cdot d(V \cdot C_A) / dt \quad (4)$$

که طرفین این رابطه بر حسب کیلوگرم بر ثانیه می باشد. اگر طرفین رابطه ی فوق را برحسب مول بر ثانیه بازنویسی کنیم خواهیم داشت:

$$F_{in} \cdot C_{Ain} - F \cdot C_A - k \cdot V \cdot C_A = d(V \cdot C_A) / dt \quad (5)$$

که می توان آنرا بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{d C_A(t)}{dt} = \frac{C_{Ain}}{V} \cdot F_{in} - \left(\frac{F}{V} + k \right) \cdot C_A(t) \quad (6)$$

۳-۲- قانون تعادل انرژی

قانون تعادل انرژی به صورت زیر بیان میگردد.

نرخ انرژی ورودی - نرخ انرژی خروجی + نرخ انرژی تولیدی در واکنش = نرخ تغییرات انرژی در داخل سیستم
اگر مجدداً همان واکنش قبلی را در نظر بگیریم و فرض کنیم که این واکنش گرمازا باشد، آنگاه رابطه ی بالا را می توان بصورت زیر بنویسیم:

$$F_{in} \cdot \rho_{in} \cdot C_P \cdot [T_{in} - T_{datum}] - F \cdot \rho \cdot C_P \cdot [T_{in} - T_{datum}] - k \cdot V \cdot C_A \cdot \Delta H = \rho \cdot C_P \cdot V \cdot d(T) / dt \quad (7)$$

که در آن منظور از C_P گرمای ویژه می باشد.

از طرفی:

$$dE / dt = d[M \cdot C_P \cdot (T - T_{datum})] / dt = M \cdot C_P \cdot d(T - T_{datum}) / dt = M \cdot C_P \cdot dT / dt = V \cdot \rho \cdot C_P \cdot dT / dt \quad (8)$$

همچنین اگر گرمای خروجی از سیستم (گرمای خروجی توسط ماده خروجی و همچنین گرمای خروجی توسط خنک کننده های راکتور) را بطور کلی با Q بنویسیم، آنگاه رابطه (V) را می توانیم بصورت زیر بازنویسی کنیم:

$$F_{in} * \rho_{in} * C_p * [T_{in} - T_{datum}] - Q - k * V * C_A * \Delta H = dE/dt \quad (9)$$

همچنین ضریب واکنش k نیز توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$k = k_0 e^{-E/RT}$$

که در آن k_0 یک ضریب بوده، E انرژی فعال سازی، T دمای واکنش و R ثابت قانون گازها می باشد.

برای مدل کردن گرمای خروجی سیستم یا همان Q با انجام یک سری فرض می توان به رابطه ی زیر رسید:

$$Q = (\alpha F_c^{\beta+1} (T - T_{c(in)})) / (F_c + \alpha F_c^{\beta} / 2\rho C_p) \quad (10)$$

در نهایت می توان نوشت:

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \rho C_p F (T_{in} - T) - k V C_A \Delta H - \frac{\alpha F_c^{\beta+1} (T - T_{in})}{F_c + \frac{\alpha F_c^{\beta+1}}{2\rho C_p}} \quad (11)$$

به این ترتیب روابط حاکم بر یک CSTR را می توانیم بصورت زیر خلاصه کنیم

$$\frac{dC_A(t)}{dt} = \frac{C_{Ain}}{V} * F_{in} - \left(\frac{F}{V} + k \right) * C_A(t)$$

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \rho C_p F (T_{in} - T) - k V C_A \Delta H - \frac{\alpha F_c^{\beta+1} (T - T_{in})}{F_c + \frac{\alpha F_c^{\beta+1}}{2\rho C_p}}$$

که با جایگذاری $k = k_0 e^{-E/RT}$ در رابطه ی بالا و همچنین با فرض اینکه نرخ سیال ورودی برابر با نرخ سیال خروجی باشد، می توان نوشت:

$$\frac{dC_A(t)}{dt} = \frac{F}{V} * (C_{Ain} - C_A) - k_0 e^{-E/RT} C_A \quad (12)$$

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \rho C_p F (T_{in} - T) - k_0 e^{-E/RT} V C_A \Delta H - \frac{\alpha F_c^{\beta+1} (T - T_{in})}{F_c + \frac{\alpha F_c^{\beta+1}}{2\rho C_p}} \quad (13)$$

در نهایت اگر روابط فوق را حول نقطه ی تعادل سیستم خطی سازی کرده و آنها را به فرم معادلات حالت بازنویسی کنیم، خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \dot{C}_A \\ \dot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_A \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} F_c + \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & C_{13} \\ 0 & C_{22} & C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{Ain} \\ T_{in} \\ F \end{bmatrix} \quad (14)$$

که مولفه های این ماتریس ها در حالت تعادل برابرند با:

$$A_{11} = -\frac{F}{V} - k_0 e^{-E/RT}$$

$$A_{12} = -\frac{k_0 E}{RT^2} e^{-E/RT} C_A$$

$$A_{21} = -\frac{\Delta H}{\rho C} k_0 e^{-E/RT}$$

$$A_{22} = -\frac{F_{SS}}{V} + \frac{\Delta H k_0 E}{\rho C_P R T^2} e^{-\frac{E}{RT} C_A} - \frac{\alpha F_c^{\beta+1}}{V \rho C_P F_c + \frac{\alpha F_c^\beta V}{2}}$$

$$B_2 = \frac{-\alpha F_{CSS}^\beta (F_{SS} + \frac{\alpha F_{CSS}^\beta}{\rho C_P}) (T - T_{C(in)})}{[V \rho C_P F_{SS} + \frac{\alpha F_{CSS}^\beta V}{2}]^2}$$

$$C_{11} = \frac{F}{V}$$

$$C_{13} = \frac{C_{Ain} - C_A}{V}$$

$$C_{22} = \frac{F}{V}$$

$$C_{23} = \frac{T_{in} - T}{V}$$

و مولفه های آن به اختصار عبارتند از:

جدول ۱- پارامترهای مدل

واحد	توصیف	سمبل
$\frac{m^3}{s}$	جریان	F
m	ارتفاع	H
$\frac{kg}{m^3}$	چگالی	ρ
m^2	سطح مقطع مخزن	A
$\frac{mole}{m^3}$	غلظت	C
$\frac{kg}{mole}$	جرم مولی	M
--	ضریب واکنش	k
J/kg/K	گرمای ویژه	C_P
K	دما	T
J	انرژی فعالسازی	E
J/mole/K	ثابت قانون گازها	R
J/mole	گرمای واکنش	ΔH

معمولاً در یک CSTR هدف آن است که بتوان دمای سیال درون راکتور را توسط کنترل جریان سیال خنک کننده F_C و یا گرمای ورودی به راکتور کنترل کرد، که در این بین دما و غلظت و جریان سیال ورودی به مخزن به عنوان عوامل مزاحم عمل می کنند.

۴- نتایج شبیه سازی

با مدل سازی مخزن CSTR که در بخش قبلی بحث شد، مدل فضای حالت زیر را برای مخزن CSTR در نظر می گیریم.

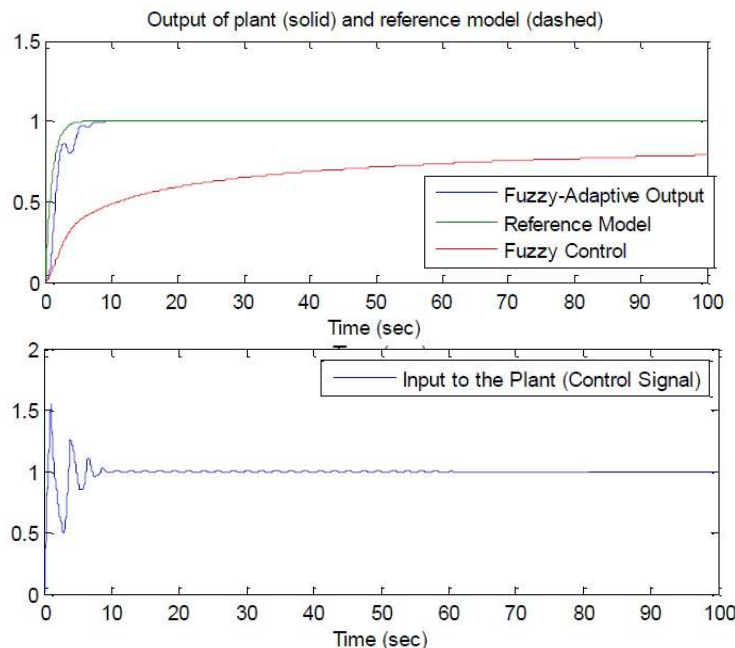
$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1.414 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0]x = x_1$$

که در آن، ورودی u دبی سیال وارد شده به مخزن، حالت x غلظت سیال و خروجی y دمای سیال موجود در مخزن می باشد. مدل مرجع در نظر گرفته شده در نظریه فازی تطبیقی، یک مدل خطی و مرتبه اول بصورت زیر می باشد.

$$G(S) = \frac{1}{S + 1}$$

در شکل ۱، خروجی سیستم کنترل فازی تطبیقی مدل مرجع و کنترل فازی معمولی رسم شده است.



شکل ۱- خروجی سیستم کنترل فازی تطبیقی

همانطور که از شکل ۱ مشخص است، کنترل فازی عملکرد کندی دارد، اما در حالت استفاده از کنترل فازی تطبیقی، سیستم کنترلی مدل مرجع خطی و مرتبه اول را بخوبی دنبال می نماید.

جدول ۲- پارامترهای مدل

مجموع مربعات خطا	مجموع خطا	
۰,۲۵۷	۱,۰۳۵	سیستم کنترل فازی تطبیقی
۱۳,۲۲	۳۳,۴۶	کنترل فازی معمولی

همانطور که از جدول ۲ مشخص است، سیستم کنترل فازی تطبیقی در مقایسه با کنترل فازی معمولی، مجموع خطای خروجی و مجموع مربعات خطای خروجی را بخوبی کاهش داده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل غیرخطی مخزن شیمیایی پر کاربرد CSTR استخراج و ارایه شده است. سپس این مدل غیرخطی، خطی سازی شده است. با استفاده از نظریه کنترل فازی تطبیقی ارتفاع این مخزن کنترل گردیده است. جهت نمایش برتری این روش کنترلی، آن را با کنترل فازی مقایسه نمودیم. مشخص گردید که روش کنترل فازی تطبیقی در مقایسه با کنترل فازی سریعتر بوده و خطای خروجی کمتری دارد.

مراجع

- [1] Bor-Sen Chen, Yu-Min Cheng and Ching-Hsiang Lee, "A genetic approach to mixed H_2/H_∞ optimal PID control," in IEEE Control Systems, vol. 15, no. 5, pp. 51-60, Oct 1995.
- [2] H. M. Hasanien, "Design Optimization of PID Controller in Automatic Voltage Regulator System Using Taguchi Combined Genetic Algorithm Method," in IEEE Systems Journal, vol. 7, no. 4, pp.825-831, Dec. 2013.
- [3] R. A. Krohling and J. P. Rey, "Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 5, no. 1, pp. 78-82, Feb 2001.
- [4] A. Aarabi, M. Shahbazian and M. Hadian, "Improved closed loop performance and control signal using evolutionary algorithms based PID controller," Carpathian Control Conference (ICCC), 2015 16th International, Szilvasvarad, 2015, pp. 1-6.
- [5] Han-Xiong Li and H. B. Gatland, "Conventional fuzzy control and its enhancement," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), vol. 26, no. 5, pp. 791-797, Oct 1996.
- [6] C. H. Huang, W. J. Wang and C. H. Chiu, "Design and Implementation of Fuzzy Control on a Two- Wheel Inverted Pendulum," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 7, pp. 2988-3001, July 2011.
- [7] C. S. Tseng and B. S. Chen, "Robust Fuzzy Observer-Based Fuzzy Control Design for Nonlinear Discrete-Time Systems With Persistent Bounded Disturbances," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 17, no. 3, pp. 711-723, June 2009.
- [8] K. Y. Cai and L. Zhang, "Fuzzy Reasoning as a Control Problem," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 16, no. 3, pp. 600-614, June 2008.
- [9] Cheng, Jun, et al. "Finite-time H_∞ fuzzy control of nonlinear Markovian jump delayed systems with partly uncertain transition descriptions." Fuzzy Sets and Systems (2016).
- [10] Faa-Jeng Lin, "Fuzzy adaptive model-following position control for ultrasonic motor," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, no. 2, pp. 261-268, Mar 1997.
- [11] Gang Feng, "An approach to adaptive control of fuzzy dynamic systems," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 10, no. 2, pp. 268-275, Apr 2002.
- [12] M. A. Khanesar, Y. Oniz, O. Kaynak and H. Gao, "Direct Model Reference Adaptive Fuzzy Control of Networked SISO Nonlinear Systems," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 1, pp. 205-213, Feb. 2016.
- [13] T. J. Koo, "Stable model reference adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, no. 4, pp. 624-636, Aug 2001.
- [14] T. J. Koo, "Stable model reference adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, no. 4, pp. 624-636, Aug 2001.